

Oskari Rantanen

# RAKENNUSTEN MITOITUS TÖRMÄYS- KUORMILLE

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
kandidaatintyö  
Kesäkuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Oskari Rantanen: Rakennusten mitoitus törmäyskuormille, Dimensioning of buildings for impact loads

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

toukokuu 2019

---

Rakentaminen on jatkuvasti tiivistymässä yhä lähemmäksi liikennöityjä väyliä. Tämä kasvattaa todennäköisyyttä rakennuksiin kohdistuviin ajoneuvojen törmäyksiin.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää kuinka mahdollinen ajoneuvon törmäys otetaan huomioon kantavien rakenteiden kuten pilareiden ja kantavien seinien mitoituksessa eurokoodien SFS-EN 1992-1-1 ja SFS-EN 1991-1-7 mukaan, ja mitkä asiat siihen vaikuttavat. Pilarin törmäysmitoitustilanteesta on laadittu esimerkki, jonka pohjalta vertaillaan eri tilanteita ja vaihtoehtoisia ratkaisuja. Laskentaesimerkissä mitoitus on suoritettu Tampereen yliopiston betonirakenteiden perusteet-kurssin harjoitustyön kantavan pilarin mitoituksen pohjalta.

Työssä tarkastellaan aluksi onnettomuustilanteita ja erityisesti törmäystä rakennusten kantaviin rakennusosiin eli pilareihin ja kantaviin seiniin. Tarkastellaan myös eri tilanteita, joissa mahdollinen törmäys aiheuttaa kantaville rakenteille törmäysmitoituksen. Sitten siirrytään erilaisiin törmäyksiin ja niiden aiheuttamiin kuormiin ja tarkastelutapoihin, kuten kovaan- ja pehmeään törmäykseen. Tämän jälkeen tarkastellaan rakennusosien mitoitusta törmäyksen ollessa kova. Saatuja tuloksia vertaillaan keskenään ja analysoidaan mitoitukseen eniten vaikuttavia asioita. Lopuksi käsitellään törmäyssuojia vaihtoehtoisena ratkaisuna mitoitukselle.

Avainsanat: törmäystilanne, törmäyskuorma, kova törmäys, törmäyssuoja

# ALKUSANAT

Tässä kandidaatin työssä tarkastellaan rakennusten kantavien rakenteiden mitoituslannetta ajoneuvon törmäyksessä. Työ on suoritettu kirjallisuustutkimuksena, johon on sisällytetty laskentaesimerkkejä. Erityinen kiitos työn onnistumisen kannalta kuuluu Tampereen yliopistonlehtori ja työn ohjaaja Olli Kerokoskelle.

Tampereella, 18.6.2019

Oskari Rantanen

Kandidaatintyö

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ONNETTOMUSSTILANTEET JA TÖRMÄYS.....	3
3. TÖRMÄYSSKUORMAT .....	6
3.1 Kova törmäys .....	6
3.2 Kovan törmäyksen staattiset kuormat.....	7
3.3 Dynaaminen analyysi .....	8
3.4 Ylärakenteeseen kohdistuva törmäys.....	9
4. PILARIN MITOITUS .....	11
4.1 Kohteen esittely .....	12
4.2 Laskenta SFS-EN 1991-1-7 ja SFS-EN 1992-1-1 avulla .....	12
5. LASKENNAN TULOKSET JA VERTAILU .....	20
6. SEINÄN MITOITUS.....	21
7. TÖRMÄYSSUOJAT .....	22
8. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET .....	26
LIITE 1: HARJOITUSTYÖN AUTOTALLI	
LIITE 2: PILARIN TIEDOT JA KUORMAT ILMAN TÖRMÄYSTÄ	
LIITE 3: LASKENTAESIMERKIN VOIMASUUREET	
LIITE 4: TOISESTA PÄÄSTÄÄN JÄYKÄSTI TUETUN PILARIN MITOITUS TÖRMÄYKSELLE	

# 1. JOHDANTO

Nykyisin rakentaminen on vahvasti keskittynyt kaupunkeihin. Väestömäärän kasvaessa muuttoliikenne kohdistuu pääasiallisesti kasvukeskuksiin, joten uusia rakennuksia tehdään entistä enemmän. Väylien rakentaminen on myös lisääntynyt ja niistä tehdään suurempia sekä nopeudeltaan että kooltaan. Tämä suuri rakentamisen määrä pakottaa rakennukset yhä lähemmäs näitä liikenneväyliä, joten todennäköisyys ajoneuvojen rakennuksiin törmäämiseen kasvaa. On siis osattava mitoittaa rakennusten törmäysalttiit osat, jotta välttäisi onnettomuustilanteissa suurilta vahingoilta. Törmäysmitoituksen merkitys tulevaisuudessa tulee siis kasvamaan ja törmäysmitoitusta tämä kandidaatin työkin tarkastelee. Törmäysmitoitus on myös oleellinen osa esimerkiksi siltojen suunnittelua, kuitenkin keskitytään tässä työssä vain rakennuksiin.

Työn painopiste kohdistuu asuinrakennusten törmäysmitoitukseen. Mitoitus esimerkit tehdään törmäykselle altistuviin rakenteisiin eli ulkoseiniin ja pilareihin. Mitoituksen apuna käytetään tämänhetkistä ohjeistusta eli eurokoodeja. Mitoitukseen vaikuttavat monet eri asiat, kuten alueet, missä törmäys tapahtuu esim. parkkihalli vai taajama-alue, törmäyksen laatu, rakenneosien materiaali ja eri ajoneuvokoot. Laskennassa huomioidaan näitä asioita ja analysoidaan niiden vaikutuksia eri tilanteissa.

Työn alussa käsitellään erilaisia onnettomuustilanteita ja törmäystä (luku 2). Luvussa 3 siirrytään törmäyksen aiheuttamiin onnettomuuskuormiin ja niiden muodostumiseen. Pilarin ja seinän mitoitusta käsitellään luvuissa 4, 5 ja 6. Laskennallisesti tarkastellaan vain pilariin kohdistuvaa törmäystä

Luvussa 7 tarkastellaan vaihtoehtoisia menetelmiä ja niiden vaikutuksia törmäyksen estämiseksi rakenneosaan, kuten erilaisia törmäyssuojia esimerkiksi erilaiset kaiteet ja ulkokulmasuojat. Lopuksi tehdään yhteenveto saaduista tuloksista ja eri menetelmistä ja tarkastellaan niiden vaikutuksia ja merkitystä esimerkiksi tulevaisuudessa.



## 2. ONNETTOMUSSTILANTEET JA TÖRMÄYS

Kun rakennukseen tai sen osaan kohdistuu odottamaton suuri kuorma, puhutaan onnettomuustilanteesta. Onnettomuuden voivat aiheuttaa erilaiset räjähdykset, ulkoiset ja sisäiset sortumat ja erilaiset törmäykset. Näiden ulkoisten voimien suuruuden ja vaikutuksien perusteella onnettomuustilanteet voidaan jakaa seuraamusluokkiin. Standardin (SFS-EN 1990 rakenteiden suunnitteluperusteet 2010, s.136) mukaan seuraamusluokkia on kolme ja ne määritellään taulukon 1 mukaan.

**Taulukko 1.** Seuraamusluokat (SFS-EN 1990, 2010, s. 136)

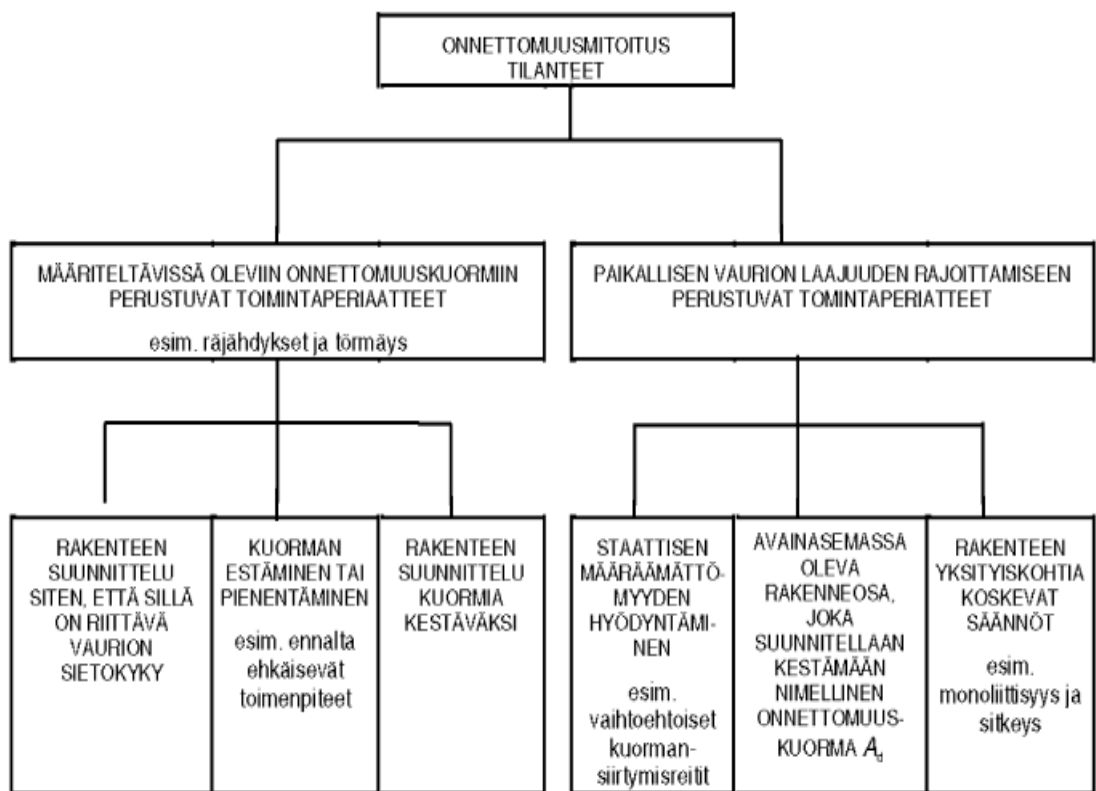
Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä
CC3	<b>Suuret</b> seuraamukset hengenmenetysten <i>tai hyvin suurten</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret (esim. konserttitalo)
CC2	<b>Keskisuuret</b> seuraamukset hengenmenetysten <i>tai merkittävien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret (esim. toimistorakennus)
CC1	<b>Vähäiset</b> seuraamukset hengenmenetysten <i>tai pienten tai merkityksettömien</i> taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varastorakennukset), kasvihuoneet

Seuraamusluokan valintaan liittyvät yllä olevan taulukon lisäksi onnettomuuskuorman määrittämiseen liittyvät tekijät. Näitä tekijöitä ovat toimenpiteet, joilla pyritään estämään onnettomuuskuorma tai sen vaikutukset, onnettomuuskuorman esiintymistodennäköisyys, kuormasta aiheutuvat vaurioiden seuraamukset, yleinen suhtautuminen ja hyväksyttävä riskitaso. Seuraamusluokkien avulla arvioidaan minkälaiset vaikutukset tapahtuvalla onnettomuudella on kokonaisuuden kannalta. Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 28) mukaan eri seuraamusluokilla on erilaiset vaatimukset mitoituksen kannalta:

- CC1: Onnettomuuskuormien vuoksi erityistarkastelua ei tarvita, paitsi sen varmistamiseksi, että noudatetaan vaurionsietokykyä ja stabiiliutta koskevia sääntöjä, jotka esitetään standardeissa EN 1990 – EN 1999.

- CC2: Rakenteen erityisolosuhteiden perusteella voidaan käyttää staattisesti ekvivalentteihin kuormitusmalleihin perustuvaa yksinkertaistettua analyysiä tai yksityiskohtien suunnittelun sääntöjä.
- CC3: On suoritettava erityistapauksen tarkastelu luotettavuustason ja tarvittavien rakenneanalyyysien perusteellisuuden määrittämistä varten. Tämä voi edellyttää riskianalyysin tekemistä ja kehittyneiden menetelmien, kuten dynaamisten analyyysien, epälineaaristen mallien sekä kuorman ja rakenteen välisen yhteisvaikutuksen käyttöä.

Rakennusallalla törmäyksillä tarkoitetaan liikkuvan kappaleen osumista kyseessä olevaan rakennukseen tai rakenteeseen, mistä muodostuu rakenteelle ylimääräistä rasitusta eli onnettomuuskuormaa. Tällaisia mitoitettavia törmäyksiä rakenteiden kannalta ovat helikopterin kova laskeutuminen katolle, laivojen- ja junien törmäys, haarukkatrukien törmäys ja tieliikenteen ajoneuvojen törmäys. Törmäysmitoitus on tarpeellista tehdä kaikille rakenteille, joille onnettomuuden todennäköisyys on huomattava ja seuraukset ovat vakavat seuraamusluokkien mukaan. Toinen vaihtoehto on pyrkiä estämään ja minimoimaan törmäyksen vaikutukset muilla keinoin. (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 30) Kuvassa 1 on esitetty ratkaisutyyppit eri onnettomuustilanteissa.



**Kuva 1.** Onnettomuustilanteiden mitoitusvaihtoehdot (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 24).



Kuvan 1 vasemman puolen avulla voidaan tehdä mitoitus lähinnä silta- ja talorakenteisiin. Tässä työssä kuitenkin tarkastellaan vain asuinkerrostalon törmäysalttiiden osien, kuten kantavien ulkoseinien ja pilareiden mitoitusta törmäyskuormille.

### 3. TÖRMÄYSKUORMAT

Rakennuksien mitoituksessa törmäyskuormat pitää huomioida kaikissa alueissa, joissa törmäyksen todennäköisyys on merkittävä tai sen vaikutukset ovat suuret. Tällaisia rakennuksia ovat esimerkiksi ahtaat pysäköintitilat ja liikenneväylien välittömässä läheisyydessä olevat rakennukset. Näiden kahden lisäksi myös kaikki rakennukset, joiden sisällä kulkee ajoneuvoja tai haarukkatrukkeja, täytyy mitoittaa mahdolliselle törmäykselle.

Törmäystilanteessa rakennuksen osat (pilarit/seinät) mitoitetaan kestävänsä törmäyksestä aiheutuvat kuormat joko rakenteen muodonmuutoskyvyn tai kestävyysavulla, jolloin kyseinen rakenne ei menetä kantokykyänsä törmäyksen tapahtuessa. Ajoneuvojen törmäyksestä aiheutuvien törmäyskuormien arvoja voidaan tarkastella usealla eri tavalla. Yksi vaihtoehto on dynaaminen analyysi, jolloin törmäystilanteeseen liittyvät esimerkiksi muodonmuutos- ja vaimennusominaisuudet, törmäysnopeus, massojen jakautuminen ja törmäyskulma. (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 30)

Ajoneuvon törmätessä tarkasteltavaan rakenteeseen oletetaan törmäävän kappaleen absorboivan kaiken energian, jolloin puhutaan kovasta törmäyksestä. Kuormat selvitetään eurokoodin (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 32–46) kohtien 4.3–4.7 avulla. Kovan törmäyksen vaikutuksia tarkastellaan tarkemmin kappaleissa 3.1 ja 3.2. Kun oletetaan rakenteen absorboivan kaiken törmäyksestä aiheutuvan energian, puhutaan pehmeästä törmäyksestä. Tällöin kuormien suuruuteen vaikuttavat rakenteen muodonmuutoskyky ja plastinen lujuus. (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 30)

Eurokoodissa (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 30) on myös esitetty ekvivalentit staattiset kuormat erilaisille liikenneväylille. Kuormien avulla selvitetään rakenteen voimasuureet mitoitusta varten. Tämän tavan avulla ratkaistaan muodonmuutokset ja kestävyys. Seuraavassa kohdassa tarkastellaan laskennallisesti vain kovaan törmäykseen perustuvaa mitoitusta.

#### 3.1 Kova törmäys

Törmäyksessä rakenteen ollessa jäykkä ja törmäävän kappaleen ollessa kimmoisa, puhutaan kovasta törmäyksestä. Tällöin törmäävä kappale absorboi kaiken törmäyk-

sestä aiheutuvan energian. Kovan törmäyksen staattisten kuormien määrittämiseen käytetään joko eurokoodin (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 32–46) kohtia 4.3–4.7 tai dynaamista analyysiä eurokoodissa kohdat C 2.1(2) ja C 2.1(3).

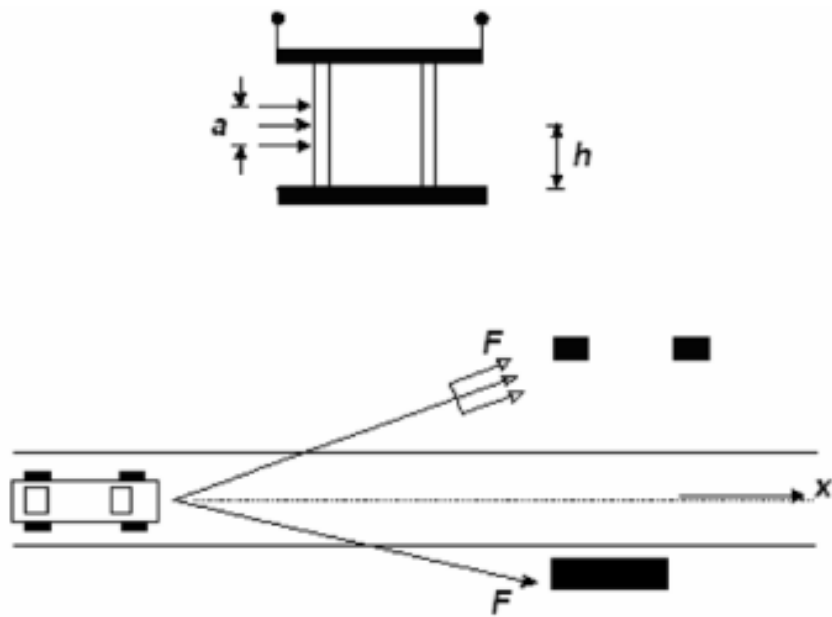
### 3.2 Kovan törmäyksen staattiset kuormat

Tarkasteltaessa ajoneuvon törmäystä tarkasteltavan rakennuksen seiniin tai pilareihin saadaan ekvivalentit staattiset mitoituskuormat rakenteelle x- ja y-suunnassa kuvan 2 avulla.

Liikenteen luokka	Kuorma $F_{dx}^a$ [kN]	Kuorma $F_{dy}^a$ [kN]
Moottoritiet sekä valta- ja kantatiet	1 000	500
Maantiet	750	375
Taajamien tiet ja kadut	500	250
Pihat ja autotallit, joihin:		
— henkilö- ja pakettiautot pääsevät kulkemaan	50	25
— kuorma-autot pääsevät kulkemaan <sup>b</sup>	150	75
<sup>a</sup> x = normaali liikenteen suunta, y = normaalin liikenteen suuntaa vastaan kohtisuoraan.		
<sup>b</sup> Termi ”kuorma-auto” tarkoittaa ajoneuvoja, joiden suurin bruttopaino on yli 3,5 tonnia.		

**Kuva 2.** Ajoneuvon törmäyksen ohjeelliset ekvivalentit staattiset kuormat (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 32).

Kuvassa 2 on esitetty rakenteeseen vaikuttavat ekvivalentit staattiset kuormat eri liikenneväylätyypeille ja ajoneuvoille liikenteen suunnassa x ja liikennettä vastaan kohtisuorassa suunnassa y. Mitoituksessa staattiselle kuormalle määritetään vaikutusalue, jolla kuorman resultantti F vaikuttaa. Eurokoodin (SFS EN 1991-1-7 2015, s. 34) mukaan henkilö- tai pakettiauton törmäyksen voimaresultantin F vaikutuskorkeus h on 0,5 m ajoradan yläpuolelle ja vaikutusalueen pinta-ala a leveys x korkeus. Korkeutena voidaan käyttää yleisesti arvoa 0,25 m ja leveyden arvoksi valitaan joko rakenteen leveys tai 1,5 m sen mukaan, kumpi on pienempi. Kuorma-auton törmäyksessä puolestaan resultantin korkeudeksi h valitaan arvo väliltä 0,5–1,5 m ja vaikutusalueen pinta-alaksi a 0,5 m x 1,5 m. Leveyden arvo määräytyy samalla tavalla kuin henkilö- tai pakettiauton tapauksessa.



**Kuva 3.** Väylien läheisyydessä olevien tukirakenteiden törmäyskuorma (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 34).

Kuvassa 3 a on suositeltavan vaikutusalueen korkeus. Korkeuden suositusarvot vaihtelevat välillä 0,25 m – 0,50 m riippuen siitä onko törmäävä ajoneuvo henkilö- tai pakettiauto vai kuorma-auto. Törmäyskuorman resultantin sijainti  $h$  ajoradan pinnasta vaihtelee välillä 0,50 m (henkilö- ja pakettiautot) – 1,50 m (kuorma-autot). Suure  $x$  tarkoittaa kaistan keskiviivaa. (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 34)

### 3.3 Dynaaminen analyysi

Rakennukselle törmäyksestä aiheutuva kuorma saadaan myös dynaamisen analyysin perusteella. Dynaamisessa analyysissä törmäys on kova eli rakenteen ajatellaan olevan liikkumaton ja jäykkä, jolloin muodonmuutokset aiheutuvat vain törmäävään kohteeseen. Tällöin suurin aiheutuva törmäyskuorma saadaan törmäävän kappaleen (ajoneuvon) nopeuden  $v_r$ , kappaleen kimmoisen jäykkyyden  $k$  ja massan  $m$  avulla kaavasta 1. (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 91)

$$F = v_r \sqrt{km} \quad (1)$$

Dynaamisessa analyysissä törmäys ajatellaan suorakaideimpulssina eli kuorman arvo nousee maksimiarvoonsa ja vaikuttaa ajan  $\Delta t$ . Kaavojen 2 ja 3 avulla saadaan törmäyksen (impulssin) kesto eli voiman  $F$  vaikutusaika. (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 91)

$$F\Delta t = mv \quad (2)$$

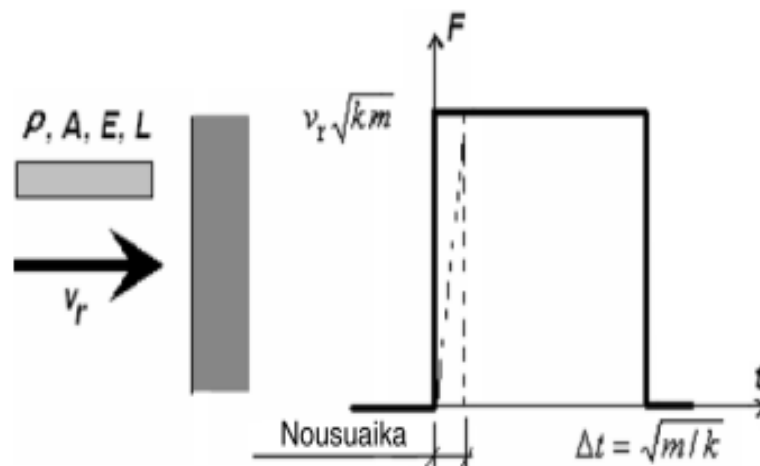
$$\Delta t = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3)$$

Törmäystilanteessa ajoneuvoa pidetään kappaleena, jonka poikkileikkaus on vakio. Tällöin kaavojen 1, 2 ja 3 kimmoinen jäykkyys  $k$  ja massa  $m$  määritellään seuraavasti: (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 92)

$$k = \frac{EA}{L} \quad (4)$$

$$m = \rho AL \quad (5)$$

Kaavoissa 4 ja 5  $E$  on kimmokerroin,  $A$  on kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala,  $L$  on kappaleen pituus ja  $\rho$  on kappaleen tiheys. Kuvassa 4 on esitetty dynaamisen analyysin periaatekuva.



**Kuva 4.** Dynaamisen analyysin periaatekuva (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 92)

### 3.4 Ylärakenteeseen kohdistuva törmäys

Rakenteiden törmäystarkastelussa huomioidaan myös kantavan rakenteen ylärakenteeseen kohdistuva törmäys. Tällainen tilanne voi syntyä kun törmäystä ei ole estetty minkäänlaisilla kaiteilla tai törmäyssuojilla tai rakenteelle ei ole määritetty riittävää alikulkukorkeutta. Käytännössä vain korkeilla ajoneuvoilla, kuten rekoilla, on mahdollisuus törmätä rakennuksen ylärakenteeseen. Tämän luvun lisäksi ylärakenteeseen kohdistuvaa törmäystä ei työssä huomioida.

Alikulkukorkeudelle on esitetty eurokoodissa (SFS EN 1991-1-7 2015, s. 34) suositukset, jotka ovat väliltä 5 m – 6 m. Eurokoodi ei kuitenkaan huomioi alikulkukorkeuden arvoon vaikuttavia muuttujia, kuten asfaltin uudelleen rakentamista.

Ekvivalentit staattiset törmäyskuormat ylärakenteeseen saadaan samalla tavalla kuin kantavan rakenteen törmäyskuormat. Taulukossa 2 on esitetty ylärakenteeseen kohdistuvat ekvivalentit staattiset kuormat.

**Taulukko 2.** Ylärakenteen ekvivalentit staattiset kuormat (SFS-EN 1991-1-7 2015, s. 34)

Liikenteen luokka	Ekvivalentti staattinen mitoituskuorma $F_{dx}^a$ [kN]
Moottoritiet sekä valta- ja kantatiet	500
Maantiet	375
Taajamien tiet ja kadut	250
Pihat ja autotallit	75
<sup>a</sup> $x$ = normaali liikenteen suunta.	

Eurokoodissa (SFS-EN 1991-1-7 2015) ei määritetä ylärakenteeseen kohdistuvia y-suuntaisia kuormia eli normaalia liikenteen suuntaa vastaan kohtisuoria kuormia.

## 4. PILARIN MITOITUS

Pilarin mitoituksessa törmäystä voidaan pitää joko pehmeänä tai kovana. Kun törmäystä pidetään kovana, saadaan kuormat selvitettyä dynaamisen analyysin perusteella tai katsoa kuvasta 2 törmäyskuormalle ohjeellinen ekvivalentti staattinen kuorma. Seuraavissa laskentaesimerkeissä tarkastellaan tilannetta, jossa törmäys on kova. Esimerkissä määritetään pilarille eurokoodien SFS-EN 1991-1-7 ja SFS-EN 1992-1-1 mukainen pää- ja hakarautoitus.

Ekvivalenttien staattisten mitoituskormien lisäksi täytyy huomioida onnettomuustilanteen kuormien mitoitussarvot kuormitusyhdistelmillä. Eurokoodissa SFS-EN 1990 (2010, s. 92) on esitetty kuormien mitoitussarvot (Taulukko 3).

**Taulukko 3.** Onnettomuustilanteiden kuormien mitoitussarvot (SFS-EN 1990 2010, s. 92)

Mitoitustilanne	Pysyvät kuormat		Määräävä onnettomuuskuorma tai maanjäristyskuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (**)	
	Epäedulliset	Edulliset		Pääasiallinen (jos on)	Muut
Onnettomuus (*) (Yht. 6.11a/b)	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$A_d$	$\psi_{1,1}$ tai $\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Maanjäristys (Yht. 6.12a/b)	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$A_{Ed} = \gamma_I A_{Ek}$		$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
(*) Onnettomuusmitoitustilanteessa määräävälle muuttuvalle kuormalle voidaan antaa sen tavallinen arvo tai kuten maanjäristyskuormayhdistelmissä, sen pitkäaikaisarvo. Valinta tehdään kansallisessa liitteessä, tarkasteltavasta onnettomuuskuormasta riippuen. Ks. myös standardia EN 1991-1-2.					
(**) Muuttuvia kuormia ovat taulukossa A1.1 mainitut kuormat.					<ACI

Mitoituksessa tarkastellaan siis taulukon 3 yhtälöä 6.11a/b. Onnettomuusmitoituksessa kuormien osavarmuusluvut saavat arvon 1.0. Muuttuvien kuormien kertoimet saadaan taulukosta 4.

**Taulukko 4.** Rakennusten suositusarvot keroimelle  $\psi$ 

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,6
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuormat (ks. EN 1991-1-3) <sup>1)</sup>			
Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H > 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H \leq 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,50	0,20	0
Rakennusten tuulikuormat (ks. EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (ks. EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
HUOM. Kertoimien $\psi$ arvot voidaan määrittellä kansallisessa liitteessä. <sup>1)</sup> Mikäli maata ei ole mainittu, kyseiset paikalliset olosuhteet selvitetään erikseen.			

Taulukosta 4 valitaan Suomessa käytetty lumikuorman kertoimen arvo 0,5.

## 4.1 Kohteen esittely

Pilarin mitoituksen laskelmissa tarkastellaan Tampereen Yliopiston rakennustekniikan tutkinto-ohjelman betonirakenteiden perusteet–kurssin harjoitustyössä esiintyvää pilaria. Tarkasteltava rakennus on kaksikerroksinen autotalli, johon kuorma-auto törmää. Harjoitustyön yksityiskohdat, kuten rakenteiden omat painot, pilarille tulevat kuormat ja rakennuksen dimensiot on esitetty liitteissä 1, 2 ja 3.

## 4.2 Laskenta SFS-EN 1991-1-7 ja SFS-EN 1992-1-1 avulla

Suoritetaan laskenta standardien SFS-EN 1991-1-7, SFS-EN 1992-1-1 ja betonirakenteiden perusteet kurssin luentomonisteen ohjeiden mukaan (Kerokoski 2018). Kohde, johon ajoneuvo törmää, on autotallin pilari. Esimerkin takia oletetaan pilarin olevan rakennuksen päädyssä toisin kuin liitteessä 1, joten törmäystarkastelu kohdistuu ainoastaan pilariin.

Tarkastellaan tilannetta, missä rakennus sijaitsee tien päädyssä ja piha-alue on sellainen, missä kuorma-autot pääsevät kulkemaan. Nyt kuvan 2 perusteella huomataan



törmäyksen tapahtuvan liikenteen suunnassa ja valitaan törmäyskuorman arvoksi  $F_T$  150 kN. Taulukoissa 3, 4 ja 5 on esitetty kuormien mitoitusarvot ja tarvittavat lähtöarvot valitaan liitteiden 1,2 ja 3 mukaan.

**Taulukko 3.** Pilarin lähtötiedot

Pilarin lähtötiedot	suure	arvo	yksikkö
poikkileikkauksen arvioitu leveys	b	280	mm
poikkileikkauksen arvioitukorkeus	h	280	mm
Pilarin korkeus	l	3250	mm
Poikkileikkauksen ala	$A_c$	78400	mm <sup>2</sup>
Neliömomentti	$I_c$	512213333	mm <sup>4</sup>

**Taulukko 4.** Materiaalien lähtötiedot

Materiaalien lähtötiedot	f <sub>ck</sub> (Mpa)	f <sub>yk</sub> (Mpa)
Teräs B500B		500
Betoni C50/60	50	

**Taulukko 5.** Kuormien mitoitusarvot

Pilarille tulevat kuormat	suure	arvo	yksikkö
Pystykuormien mitoitusarvo	$\Sigma(N_{gd}+N_{qd})$	1208,47	kN
Vaakakuorman mitoitusarvo	$F_t$	142,5	kN

Betonin puristuslujuuden ja teräksen myötölujuuden mitoitusarvot saadaan onnettomuustilanteen materiaaliosavarmuuslukujen avulla kaavoista 6 ja 7 (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 35).

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1 \cdot 50 \text{ MPa}}{1,2} = 41,7 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$f_{yd} = \frac{\alpha_{cc} f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{1 \cdot 500 \text{ MPa}}{1,0} = 500 \text{ MPa} \quad (7)$$

Kaavoissa 6 ja 7  $\alpha_{cc}$  on pitkäaikaistekijät huomioiva kerroin ja  $\gamma_s$  ja  $\gamma_c$  ovat taulukon 6 mukaiset materiaaliosavarmuusluvut.

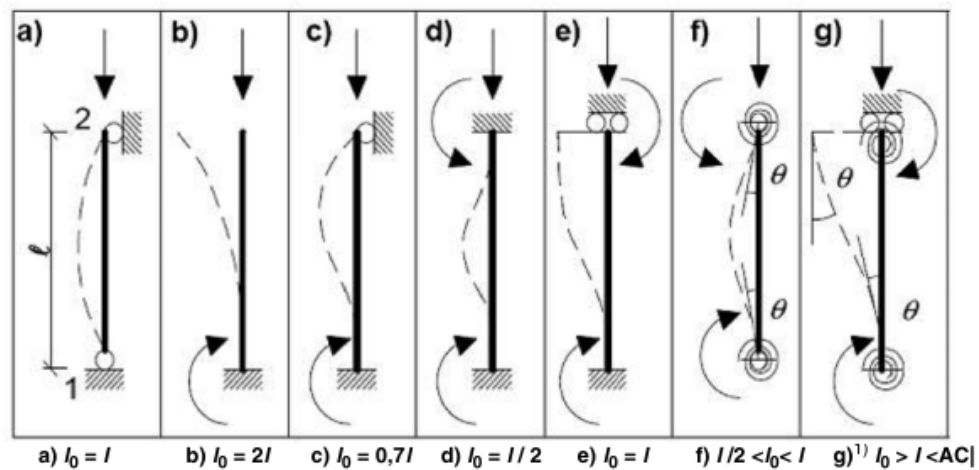
**Taulukko 6.** Betonin ja teräksen materiaaliosavarmuusluvut (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 26)

Mitoitustilanteet	betonin $\gamma_c$	betoniteräksen $\gamma_s$	jänneteräksen $\gamma_s$
Normaalisti vallitseva ja tilapäinen	1,5	1,15	1,15
Onnettomuus	1,2	1,0	1,0

Pilari mitoitetaan seuraamusluokan CC2 mukaan, joten törmäysmitoitus on tehtävä. Pilarin rasitusluokaksi valitaan XC2 eli pinnat, jotka ovat usein kosketuksissa veden kanssa (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 48). Kuitenkaan rakenne ei ole laattamainen, jolloin suojabetonin arvoksi  $c$  saadaan 45 mm. Arvioidaan käytettäväksi terästangon paksuudeksi  $\varnothing 25$  mm ja hakojen paksuudeksi  $\varnothing_{haka} 8$  mm. Nyt määritetään poikkileikkauksen tehollinen korkeus.

$$d = h - 45 - \frac{1}{2}\varnothing - \varnothing_{haka} = 219 \text{ mm} \quad (8)$$

Valitaan pilarin rakennemalliksi päistään nivelellisesti tuettu pilari, jolloin nurjahduspituudeksi  $L_0$  saadaan pilarin pituus  $l$  (kuva 5).



**Kuva 5.** Eri tuentatapojen nurjahduspituudet (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 64)

Rakenteiden tukireaktioiden avulla saadaan törmäyskuorman aiheuttama momentti  $M_{t1}$ . (liite 3)

$$M_{t1} = 104 \text{ kNm}$$

Pilarin normaalivoiman  $N_{Ed}$  arvoksi pystykuormista saadaan 1208 kN (liite 3). Selvitetään seuraavaksi pilarin normaalivoimalle ensimmäisen kertaluvun analyysin avulla epäkeskisyydet  $e_0$  ja  $e_i$ . Epäkeskisyyden  $e_0$  lasketaan momentin  $M_{t1}$  ja normaalivoiman  $N_{Ed}$  avulla kaavasta 9 (Kerokoski 2018, s. 208).

$$e_0 = \frac{M_{t1}}{N_{Ed}} = \frac{104 \text{ kNm}}{1208 \text{ kN}} = 0,086 \text{ m} = 86 \text{ mm} \quad (9)$$

Vinoudesta aiheutuva lisäepäkeskisyyden  $e_i$  saadaan kaavasta 10. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 55)

$$e_i = \frac{L_0}{400} = \frac{3250 \text{ mm}}{400} = 8,125 \text{ mm} \quad (10)$$

Pilarin kaarevuus aiheuttaa lisätaivutusta, joka huomioidaan toisen kertaluvun analyysistä saatavalla epäkeskisyydellä  $e_2$ . Epäkeskisyydelle on standardissa (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 72) esitetty kaava:

$$e_2 = \left(\frac{1}{r}\right) \frac{L_0^2}{c} \quad (11)$$

Kaavassa 11  $L_0$  on pilarin nurjahduspituus kuvan 5 mukaan,  $1/r$  on kaarevuus ja  $c$  on kokonaiskaarevuuden jakautumasta riippuva kerroin ja jonka arvo on vakiopoikkileikkauksessa 10. Pilarin poikkileikkaus on symmetrinen, joten kaarevuus esitetään kaavalla 12. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 72)

$$\frac{1}{r} = K_r K_\varphi \frac{1}{r_0} \quad (12)$$

Kaavassa 12  $K_r$  on normaalivoimasta ja mekaanisesta raudoitussuhteesta riippuvainen korjauskerroin ja  $K_\varphi$  on virumisen huomioiva kerroin. Korjauskertoimen arvoksi valitaan  $K_r = 1$ , jolloin saadaan varmalle puolelle tuleva raudoitusmäärä. Kaavan 12 termi  $\frac{1}{r_0}$  saa muodon (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 72):

$$\frac{1}{r_0} = \varepsilon_{yd}(0,45d) \quad (13)$$

Ja edelleen 
$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (14)$$

Kaavoissa 13 ja 14  $d$  on poikkileikkauksen tehollinen korkeus ja  $f_{yd}$  on teräksen myötölujuuden mitoitusarvo. Nyt epäkeskisyyden kaava saadaan muotoon:

$$e_2 = K_r K_\varphi \frac{f_{yd}/E_s}{4,5d} L_0^2 \quad (15)$$

Kaavan 13 virumiskertoimen  $K_\varphi$  tulee toteuttaa standardin (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 73) mukaan ehto  $K_\varphi \geq 1$ . Virumiskerroin saadaan laskettua kaavasta 16 ja sen määrittämiseksi on selvitettävä virumisaste  $\varphi_{ef}$ . Virumaluvun arvoksi oletetaan tässä esimerkissä 1,5. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 73)

$$K_{\varphi} = 1 + \beta \varphi_{ef} = 1 + \left(0,35 + \frac{f_{ck}}{200} + \frac{\lambda}{150}\right) \varphi_{ef} \quad (16)$$

Virumiskertoimen kaavassa  $\lambda$  on hoikkuusluku ja  $f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo. Hoikkuusluku saadaan laskettua kaavan 17 mukaan: (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 65)

$$\lambda = \frac{L_0}{i} \quad (17)$$

Kaavan 17 merkki  $i$  on betonipoikkileikkauksen jäyhyysäde. Sen laskemiseksi tarvitaan betonipoikkileikkauksen pinta-ala  $A_c$  ja neliömomentti  $I_c$ . Jäyhyysäde saadaan laskettua kaavasta 18 taulukon 3 arvojen avulla. (Kerokoski 2018, s. 205)

$$i = \sqrt{\frac{I_c}{A_c}} = \sqrt{\frac{512213333 \text{ mm}^4}{78400 \text{ mm}^2}} = 80,8 \text{ mm} \quad (18)$$

Nyt sijoitetaan saatu arvo hoikkuusluvun kaavan ja saadaan.

$$\lambda = \frac{L_0}{i} = \frac{3250 \text{ mm}}{80,8 \text{ mm}} = 40,2$$

Tarkistetaan virumiskertoimen ehto kaavalla 16.

$$K_{\varphi} = 1 + \left(0,35 + \frac{50}{200} + \frac{40,2}{150}\right) 1,5 = 2,3 \geq 1 \quad \text{OK}$$

Kaavasta 15 lasketaan toisen kertaluvun analyysin mukainen taipuma  $e_2$ .

$$e_2 = 1 \cdot 2,3 \cdot \frac{\frac{500 \text{ MPa}}{200 \cdot 000 \text{ MPa}}}{4,5 \cdot 219 \text{ mm}} \cdot (3250 \text{ mm})^2 = 62 \text{ mm}$$

Pilarin mitoittava momentti saadaan laskettua normaalivoiman  $N_{Ed}$  ja epäkeskisyyksien  $e_0$ ,  $e_{ii}$  ja  $e_2$  avulla. Tarkistetaan vielä toteutuuko vähimmäisepäkeskisyyden ehto (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 82).

$$e_{\text{vähimmäis}} = \max\left(\frac{h}{30}; 20 \text{ mm}\right) = 20 \text{ mm} < \sum e = 133 \text{ mm} \rightarrow \text{OK}$$

Ehto toteutuu, joten lasketaan pilarin lopullinen mitoittava momentti  $M_{Ed}$  normaalivoiman ja epäkeskisyyksien avulla kaavasta 19.

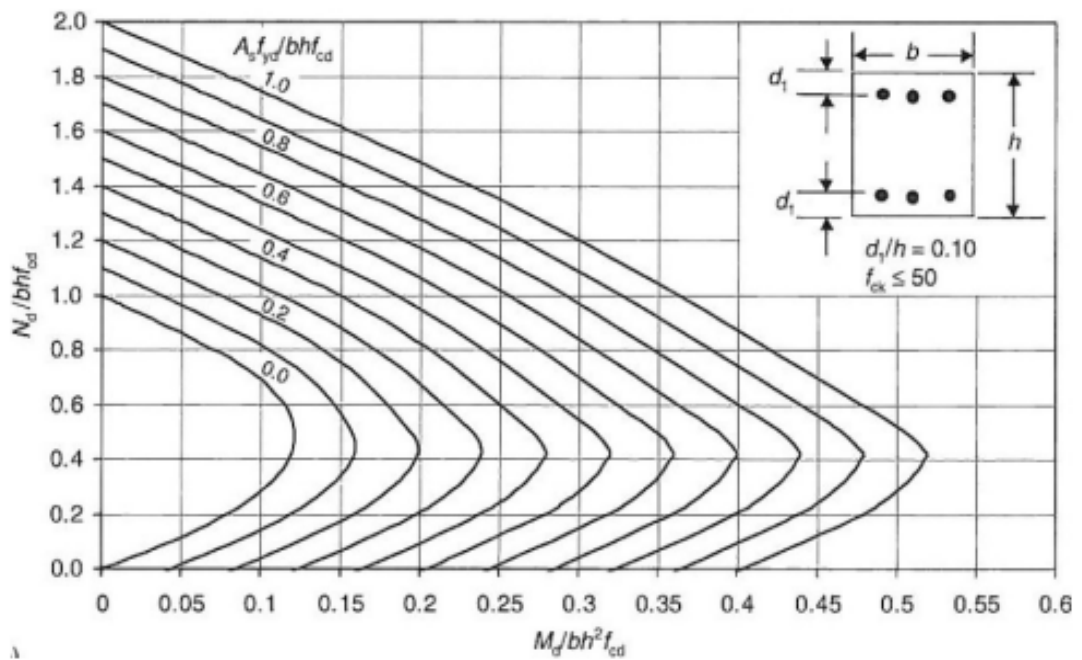
$$\begin{aligned} M_{Ed} &= N_{Ed}(e_0 + e_{ii} + e_2) \\ M_{Ed} &= 1208 \text{ kN}(0,086 + 0,008125 + 0,062) \text{ m} \\ M_{Ed} &= 188 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (19)$$

Pilareille raudoituksen määrä selvitetään mekaanisen raudoitussuhteen avulla kuvasta 6. Mekaanisen raudoitussuhteen selvittämiseksi tarvitaan suhteellinen normaalivoima  $\nu$  ja suhteellinen momentti  $\mu$ , jotka saadaan kaavoista 20 ja 21. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 70)

$$\nu = \frac{N_{ed}}{bh f_{cd}} = \frac{1208470N}{280mm \cdot 280mm \cdot 35,42MPa} = 0,43 \quad (20)$$

$$\mu = \frac{M_{ed}}{bh^2 f_{cd}} = \frac{188000000Nmm}{280mm \cdot 280mm^2 \cdot 35,42MPa} = 0,24 \quad (21)$$

Katsotaan kuvasta 6 suhteellisen momentin ja normaalivoiman avulla pilarin mekaaninen raudoitussuhde x-akselin arvolla 0,24 ja y-akselin arvolla 0,43.



**Kuva 6.** Mekaanisen raudoitussuhteen mitoituskäyrästä (Kerokoski 2018, s. 214)

Kuvaajasta valitaan mekaanisen raudoitussuhteen  $\omega$  arvon 0,3 käyrä. Saatu arvo sijoitetaan mekaanisen raudoitussuhteen kaavaan 22 ja ratkaistaan tarvittava pääraudoitusten pinta-ala  $A_s$  (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 64).

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{(b h f_{cd})} \rightarrow \quad (22)$$

$$A_s = \frac{\omega b h f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,3 \cdot 280 \cdot 280 \cdot 35,42MPa}{500MPa} = 1666 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

Kokeillaan täyttääkö neljä 25mm halkaisijaltaan olevaa tankoa vaaditun pinta-alan.

$$A_{pääraudoitus} = 4\pi r^2 = 4\pi \cdot (12,5\text{mm})^2 = 1964\text{ mm}^2 \quad (24)$$

Edellä mainittujen raudoitusmäärien tulee standardin (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 150) mukaan täyttää raudoituksen vähimmäispinta-alan vaatimukset (kaava 25).

$$A_{s,min} = \frac{0,1N_{ed}}{f_{yd}} = 242\text{mm}^2 \text{ tai } A_{s,min} = 0,002A_c = 157\text{mm}^2 \quad (25)$$

Valitun raudoituksen on myös toteutettava maksimiraudoituksen ehto poikkileikkaukselle (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 160). Pääraudoituksen enimmäisala on esitetty kaavassa 26.

$$A_{s,max} = 0,06A_c = 4704\text{mm}^2 > A_{pääraudoitus} \text{ OK} \quad (26)$$

Pääraudoitukselle asetetut ehdot toteutuvat, joten valitaan pääraudoitus 4T25. Pääraudoituksen lisäksi pilarille määritetään hakaraudoitus sitomaan pystysuuntaisia päärautoja. Hakojen halkaisijaksi valitaan vähintään 6 mm tai neljäsosa pääraudoitustankojen halkaisijasta. Koska päätankojen halkaisija on 25 mm, valitaan 8 mm haat. Hakojen jakovälille on ilmoitettu standardissa enimmäisarvo  $S_{cl,tmax}$ , joka on pienin seuraavista.

- 20 kertaa päätankojen halkaisija (400 mm)
- Pilarin pienin sivumitta (280 mm)
- 400 mm

Suluissa on esitetty tämän esimerkin arvot, joten valitaan jakovälin enimmäisarvoksi  $S_{cl,tmax} = 400\text{mm}$ . Törmäystilannetta ei oteta hakojen valinnassa huomioon, joten valitaan hakojen jakoväliksi  $k=200\text{ mm}$ .

Törmäystilanteessa pilariin kohdistuu suuri pistevoima, joten on syytä tarkistaa pilarin leikkauskestävyys. Leikkauskestävyyden tarkastelussa pilari oletetaan palkkirakenteeksi ja selvittää pilarin leikkauskestävyys. Leikkauskestävyyden selvittämiseksi käytetään apuna (betonirakenteiden perusteet–kurssin luentomonistetta) ja standardia SFS-EN 1992-1-1.

Määritettyjen hakojen avulla tarkistetaan kestäkö pilari tulevat rasitukset. Leikkausvoiman maksimiarvoksi  $V_{Ed}$  saadaan 104 kN. Leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyydelle on standardissa (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 84) kaava:

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (27)$$

Leikkauskestävyyden kaavassa  $\rho_l$  on pääraudoituksen raudoitussuhde,  $\sigma_{cp}$  normaali-voimasta aiheutuva puristusjännitys ja  $k$  sekä  $k_1$  ovat kaavan kertoimia. Pilari ei kestä törmäyksestä aiheutuvaa kuormaa, joten kasvatetaan pilarikokoa kokoon 400x400. Tällöin teholliseksi korkeudeksi  $d$  saadaan noin 340 mm. Kertoimen  $k_1$  suositusarvo on 0,15 sekä kertoimen  $k$  arvo saadaan kaavasta 28 (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 84-85).

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{340}} = 1,767 \leq 2,0 \quad \text{OK} \quad (28)$$

Raudoitussuhteen on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin 0,02 ja sille on kaava. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 84)

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} = \frac{1964 \text{ mm}^2}{400 \text{ mm} \cdot 340} = 0,0144 \leq 0,02 \quad \text{OK} \quad (29)$$

kaavassa 29  $A_{sl}$  on pääraudoituksen pinta-ala.  $C_{Rd,c}$  lasketaan kaavalla 30. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 85)

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,2} = 0,15 \quad (30)$$

Normaalivoimasta aiheutuva puristusjännitys selvitetään normaalivoiman ja betoni poikkileikkauksen pinta-alan avulla. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 84)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{1208470 \text{ N}}{400 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm}} = 7,55 \text{ MPa} \quad (31)$$

Nyt voidaan laskea kaavan 27 avulla rakenteen leikkauskestävyys.

$$V_{Rd,c} = \left[ 0,15 \cdot 1,767 (100 \cdot 0,0144 \cdot 50 \text{ MPa})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot 7,55 \right] 400 \text{ mm} 340 \text{ mm} \quad (32)$$

$$V_{Rd,c} = 304 \text{ kN} > V_{Ed} = 103,85 \text{ kN}$$

Rakenteen leikkauskestävyys on suurempi kuin suurin vaikuttava leikkausvoima, joten rakenne kestää törmäyksestä aiheutuvan leikkausvoiman omalla hakaraudoituksellaan. Pilarikoon kasvattaminen parantaa sen kestävyyttä päärautojen mitoituksessa, joten valitaan pilarin lopulliseksi poikkileikkaukseksi 400x400. Mikäli pilari ei kestäisi leikkausvoiman maksimi arvoa, täytyisi sille mitoittaa myös leikkausraudoitus (suuremmat haat), mutta jätetään se tässä työssä tarkastelematta.

## 5. LASKENNAN TULOKSET JA VERTAILU

Ilman törmäystä pilarin pääraudoituksen pinta-alaksi  $A_s$  saadaan  $919 \text{ mm}^2$ , mikä tarkoittaa neljää 20 mm halkaisijaltaan olevaa tankoa. Tilanteessa, jossa törmäys tapahtuu, saadaan vaadituksi pinta-alaksi  $1666 \text{ mm}^2$ . Pääraudoituksen pinta-alan vaatimus siis melkein kaksinkertaistuu ja se saadaan täytettyä neljällä 25 mm halkaisijaltaan olevalla tangolla.

Mitoituksessa on monia rakenteen kestävyysvaikuttavia asioita, kuten terästen paksuus, betonin lujuus ja dimensiot sekä tuentatapa. Mitoitukseen merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat betonin laatu, dimensiot ja tuentatapa. Liitteen 2 pilarin mitoitus on tehty betonin lujuudella C30/37, mutta törmäystilanteessa lujuuden täytyy olla vähintään C50/60 eli käytetään huomattavasti lujempaa betonia. Poikkileikkauksen kasvattaminen parantaa pilarin normaalivoima- ja nurjahduskestävyyttä, mutta tämä huomioitiin vain leikkauskestävyyden määrittämisessä.

Liitteessä 4 on esitetty pilarin mitoitus törmäykselle erilaisella tuennalla, jolloin pääraudoituksen vaadituksi pinta-alaksi saadaan  $555 \text{ mm}^2$ . Tämä tarkoittaa neljää 16 mm halkaisijaltaan olevaa tankoa. Erilainen tuenta myös kasvattaa leikkausvoimaa pilarin alapäässä, mikä lisää leikkausraudoituksen suuruutta. Tuennan merkitys on siis huomattavan suuri.

Leikkauskestävyyden tarkastaminen on myös tärkeää varsinkin pienillä pilarikooilla. Tästä syystä törmäysalttiit pilarit ovat usein paksumpia kuin muut, koska pilari poikkeileikkausta joudutaan kasvattamaan leikkausvoiman kestäväksi.



## 6. SEINÄN MITOITUS

Seinärakenteet voivat olla joko kantavia tai ei-kantavia riippuen niiden rasituksista. Asuinrakennusten törmäykselle mitoitettavat seinät ovat kantavia ja ne ovat usein raudoittamattomia. Tapahtuvan törmäyksen takia kantavat seinät voidaan myös mitoittaa raudoitettuina.

Raudoitettujen seinärakenteiden mitoitus perustuu pitkälti pilarin mitoitukseen. Kantavien seinien on siis otettava vastaan pystysuuntaista kuormitusta samalla tavalla kuin pilarit. Ensimmäisen ja toisen kertaluvun epäkeskisyydet huomioidaan seinää mitoittaessa kaavojen 9, 10 ja 15 mukaan. Pilareiden tapaan seinille on myös valittava tuentavasta riippuvainen nurjahduspituus kuvan 5 mukaan (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 65).

Raudoituksen määrä on riippuvainen suhteellisesta normaalivoimasta ja suhteellisesta momentista, joten tarvittava pystytankojen pinta-ala seinälle saadaan kuvan 6 mitoituskäyrästön avulla kaavasta 22 ja 23. Seinille pätevät samat pystyraudoituksen maksimi ja minimiarvot (kaavat 25 ja 26) (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 161). Puolet pystyraudoituksesta jaetaan seinän kummallekin pinnalle. Pystytankojen jakovälille on eurokoodissa (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 161) asetettu vaatimukset: kahden rinnakkaisen pystytangon välinen etäisyys ei saa ylittää kolminkertaista seinän paksuutta tai 400 mm sen mukaan, kumpi on pienempi

Pystyraudoituksen lisäksi seiniin vaaditaan vaakaraudoitus ja mahdollinen poikittaisraudoitus. Vaakaraudoitus asennetaan seinän molempiin pintoihin ja sen arvoksi  $A_{sh,min}$  valitaan joko 25 % pystytankojen pinta-alasta tai  $0,001A_c$  sen mukaan, kumpi on suurempi. Vaakaraudoituksen jakoväli saa olla enintään 400 mm. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 161)

Seinille valitaan poikittaisraudoitus, kun pystyraudoitus ylittää  $0,02A_c$  arvon seinän molemmissa pinnoissa ja silloin, kun pystytangot sijoitetaan tavallista lähemmäksi seinän pintoja. Tilanteissa, joissa käytetään langoista hitsattuja tankoja, joiden halkaisija on pienempi tai yhtä suuri kuin 16 mm ei poikittaisraudoitus ole tarpeellinen. (SFS-EN 1992-1-1 2015, s. 161)

## 7. TÖRMÄYSSUOJAT

Rakenteiden törmäysmitoitukselle vaihtoehtoinen ratkaisu on erilaiset törmäyssuojat. Törmäyssuojilla tarkoitetaan rakenteen eteen tai ympärille asennettavia kaiteita tai esteitä, joiden tarkoitus on pienentää törmäyksestä aiheutuvia vaikutuksia tai estää ne kokonaan.

Suurten väylien ympärille rakentamisessa on käytetty jo pitkään erilaisia kaiteita törmäysten vaikutusten pienentämiseksi läheisiin rakenteisiin, erityisesti siltarakenteisiin. Suojien käyttö on kuitenkin nousussa myös muussa rakentamisessa, koska se helppo ja edullinen tapa saada riittävä varmuus rakenteiden kantavuudelle törmäystilanteessa. Erilaisille törmäyskaiteille on asetettu vaatimukset eurokoodissa EN 1317 Road restraint systems.

Vanhoissa asuinrakennuksissa törmäys on huomioitu kantavien rakenneosien koon kasvattamisella. Esimerkiksi kerrostalon väylän läheisyydessä oleva parvekepilari on huomattavasti paksumpi kuin muut pilarit (kuva 7).



**Kuva 7.** Törmäys huomioitu suuremmalla pilarilla

Kuvassa 7 on esitetty törmäyksen huomiointi pilarikoon kasvattamisella. Tästä ratkaisusta on kuitenkin melkein kokonaan siirrytty törmäyssuojiiin. Suojat ovat myös usein esteettisempiä, kuin paksut pilarit. Asuinrakennusten pilareiden törmäyssuojat rakennetaan usein erilaisista harkkorakenteista tai teräsbetonirakenteista (kuva 8). Tällöin rakenteen ympäristö saadaan myös muokattua paljon ympäristöönsä sopivammaksi.



**Kuva 8.** Rakenteen suojaus törmäyssuojalla

Kuvassa 8 on esitetty rakenteen törmäyksen huomioiminen törmäyssuojalla. Muiden kantavien rakenteiden, kuten seinien törmäys huomioidaan usein seinien mitoittamisessa törmäyksen kestäväksi. Kantavat seinät voidaan myös suojata törmäyskaiteilla tai suojilla.

Törmäyssuojien käytöllä vältetään pilareiden törmäysmitoitukselta ja huomattavasti paksummilta maantasossa olevilta pilareilta. Kokonaisuudessaan suojat ovat esteettisempi ratkaisu törmäysmitoituksen huomioimiseksi.

## 8. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin miten rakennuksiin kohdistuvat ajoneuvojen törmäykset otetaan kantavien rakenteiden mitoituksessa huomioon. Tyypillisestä mitoitusilanteesta tehtiin laskentaesimerkki ja siten saatuja tuloksia vertailtiin tilanteeseen ilman törmäystä. Myös eniten mitoitukseen vaikuttavia asioita tutkittiin ja niiden vaikutuksia analysoitiin. Pilarin mitoitukselle vaihtoehtoisia ratkaisuja, kuten törmäyssuojia, käsiteltiin pinta-puolisesti.

Ajoneuvon törmäyksessä kantavien rakenteiden mitoitus perustuu seuraamusluokkiin, joiden mukaan valitaan tarvitseeko törmäystarkastelu kyseessä oleville rakenteille tehdä. Usein törmäystarkastelu suoritetaan rakennuksille, joiden vieressä tai sisällä liikennöidään.

Törmäyksestä rakenteille aiheutuvat kuormat selvitetään soveltaen joko kovaan tai pehmeään törmäykseen perustuvaa laskentaa. Kovan törmäyksen aiheuttamat kuormat saadaan selvitettyä dynaamisen analyysin perusteella tai suoraan ekvivalenttien staattisten mitoituskuormien avulla. Työssä esiintyvät esimerkit on laskettu käyttäen näitä mitoituskuormia.

Pilarin mitoituksessa tarkastellaan pilarin normaalivoima-, nurjahdus- ja leikkausvoimakestävyyttä. Nurjahdus- ja normaalivoimakestävyys otetaan mitoitusilanteessa huomioon ensimmäisen ja toisen kertaluvun epäkeskisyyksien avulla ja näin selvitetään pilariin tarvittava pystysuuntainen pääraudoitus. Leikkauskestävyyden tarkastelussa on pilaria ajateltava palkkirakenteena, jotta voidaan selvittää riittävätkö määritetyt raudoitusmäärät kestämään törmäyksestä aiheutuvat leikkausvoimat. Merkittävimmät mitoitukseen vaikuttavat asiat ovat betonipoikkileikkauksen mitat, betonin lujuus ja pilarin tuentatapa.

Eurokoodien mukaisien mitoitusapojen huomataan olevan seinillä ja pilareilla hyvinkin samanlaiset. Molemmat rakenteet mitoitetaan normaalivoimalle, nurjahdukselle ja leikkaukselle.

Kantavien rakenteiden törmäysmitoitukselle vaihtoehtoinen ratkaisu on törmäyssuojat. Ne asetetaan törmäysalttiin rakenteen eteen tai ympärille pienentämään tai estämään törmäyksestä aiheutuvat ylimääräiset rasitukset. Törmäyssuojien käyttö on yleistymässä myös asuinrakentamisessa esteettisyytensä vuoksi.

Rakentaminen tiivistyy jatkuvasti myös väylien läheisyyteen, jolloin törmäysten todennäköisyys kasvaa. Törmäysmitoituksen merkitys siis kasvaa tulevaisuudessa.

## LÄHTEET

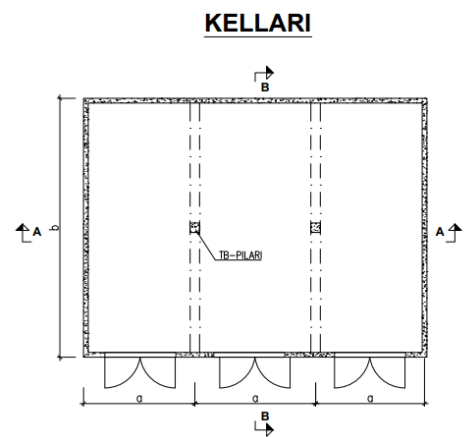
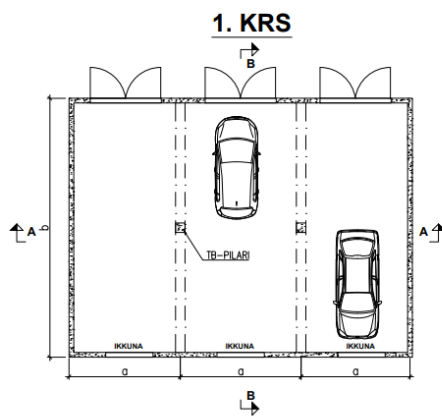
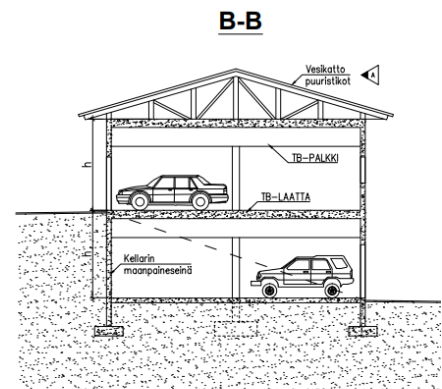
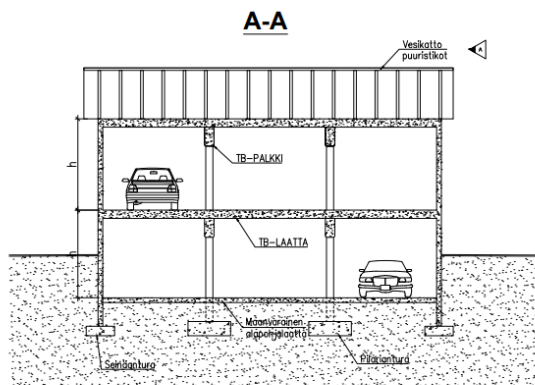
SFS-EN 1990+A1+AC (2010). Eurokoodi, Rakenteiden suunnitteluperusteet, Suomen standardisoimisliitto SFS, 185 s. päivitetty 3.8.2010, Saatavissa (viitattu 16.3.2019): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/150857.html.stx>

SFS-EN 1991-1-7+A1+AC (2015). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, Osa 1-7: Yleiset kuormat, Onnettomuuskuormat, Suomen standardisoimisliitto SFS, 118 s. päivitetty 28.8.2015, Saatavissa (viitattu 18.3.2019): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/385623.html.stx>

SFS-EN 1992-1-1+A1+AC (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, 219 s. päivitetty 5.6.2015, Saatavissa (viitattu 29.4.2019): <https://online-sfs-fi.libproxy.tuni.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/377991.html.stx>

Kerokoski, O. (2018). Rak-32110 betonirakenteiden perusteet luentomoniste syksy 2018. Tampereen teknillinen yliopisto. 228 s.

# LIITE 1: HARJOITUSTYÖN AUTOTALLI



## LIITE 2: PILARIN TIEDOT JA KUORMAT ILMAN TÖRMÄYSTÄ

### 7. Pilari

#### a. Käytettävät rakennusmateriaalit ja perustiedot

Betoni: C30/37  $f_{ck} = 30$  MPa  $f_{cd} = 17$  MPa  
 Teräs: B500B  $f_{yk} = 500$  MPa  $f_{yd} = 434,8$  MPa  
 $E_s = 200\,000$  MPa

Arvioitu pilarin poikkileikkauksen leveys  $h = 280$  mm ja leveys  $b = 280$  mm

Pilarin korkeus  $l = 3250$  mm alemmaa kerrosta kohten

Rasitusluokka XD1 XC2 Suojabetoni  $c = 450$  mm

Arvioitu terästangon paksuus  $\phi = 25$  mm (=T) Tehollinen pilarin korkeus  $d = 223$  mm

#### b. Kuormat

Pilarin oma paino  $N_{g,oma,k} = 6,37$  kN  
 Omat painot  $N_{g,yp,k} = 448$  kN (yläpohjalta)  $\cdot 1,15$   
 Omat painot  $N_{g,vp,k} = 476$  kN (välipohjalta)  $\cdot 1,15$   
 Omat painot  $N_{g,vk,k} = 28$  kN (vesikatolta)  $\cdot 1,15$   
 Hyötykuorma  $N_{q,yp,k} = 111$  kN (yläpohjapalkilta)  $\cdot 1,5 \cdot 0,7$   
 Hyötykuorma  $N_{q,vp,k} = 278$  kN (välipohjapalkilta)  $\cdot 1,5$

Pystykuormat yhteensä  $\Sigma(N_{gd} + N_{qd}) = 1635$  kN

Tarkistus: omien painojen varmuuskerroin  $\gamma = 1,35 \Rightarrow 135 \cdot 294 = 1294$  kN

$$a = 7,5 \text{ m}$$

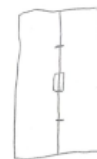
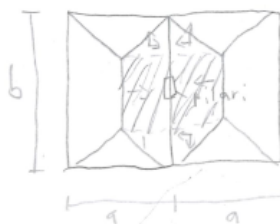
$$b - a = 14,9 \text{ m} - 7,5 \text{ m} = 7,4 \text{ m}$$

$$b/2 = 7,45$$

$$\text{ylämpi pilari paino} = 2650 \cdot 0,28 \cdot 0,28 \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 5,2 \text{ kN}$$

Painot ristiinkentävalta laatalta: viivatuulta pinta-alalta

palkin/painot alueelta



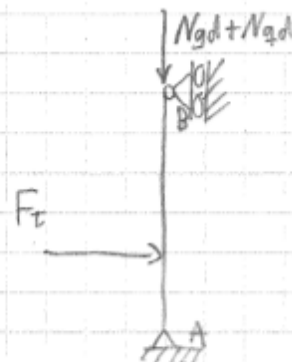


## LIITE 3: LASKENTAESIMERKIN VOIMASUUREET

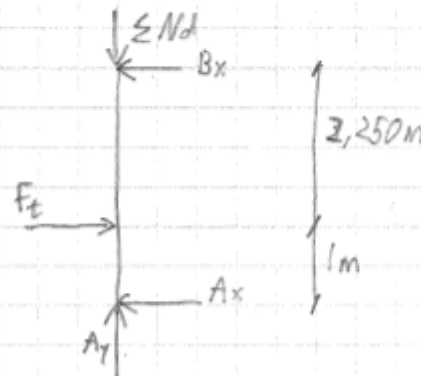
Oskari Rantanen

Pilarin voimasuureiden selvittäminen törmäyksessä.

Tarkasteltava tilanne:



Tehdään tilanteesta vapaakappalekuva:



Ratkaistaan normaalivoiman  $N_{ed}$  suuruus pystysuuntaisella tasapainoehdolla:

$$\uparrow \Sigma N_d - A_y = 0 \Rightarrow \Sigma N_d = A_y = N_{ed} \quad | \quad \Sigma N_d = N_{ed}$$

Vaikeuttavat pystykuormat saadaan taulukkojen 3 ja 4, ja liitteen 1 avulla. Tällöin normaalivoiman arvoksi saadaan:

$$N_{ed} = \Sigma N_{g,k} + 0,7 \cdot N_{q,ve,k} + 0,5 \cdot N_{q,yp,k} = 1208,47 \text{ kN}$$

Ratkaistaan seuraavaksi törmäyksestä aiheutuvat rasitukset vaakasuuntaisen tasapainoehdon ja momenttiyhtälön avulla.  $F_t =$

$$\rightarrow F_t - B_x - A_x = 0 \Rightarrow A_x = F_t - B_x = 150 \text{ kN} - 46,15 \text{ kN} = 103,85$$

momentti pisteen A ympäri

$$\begin{aligned} \textcircled{A} - F_t \cdot 1\text{m} + B_x \cdot 3,250\text{m} &= 0 \\ B_x &= \frac{F_t \cdot 1\text{m}}{3,250\text{m}} = \frac{150 \text{ kN} \cdot 1\text{m}}{3,250\text{m}} = 46,15 \text{ kN} \end{aligned}$$

Rakenteen suurin momentti vaikuttaa voiman  $F_t$  kohdassa.

Ratkaistaan momentti  $M_{t1}$

$$M_{t1} = B_x \cdot 2,250\text{m} = 46,15 \text{ kN} \cdot 2,250\text{m} = 103,84 \text{ kNm}$$

## LIITE 4: TOISESTA PÄÄSTÄÄN JÄYKÄSTI TUETUN PILARIN MITOITUS TÖRMÄYKSELLE

Oskari Rantanen

Törmäys toisesta päästään jäykästi tuettuun pilariin.

$$N_{gd} + N_{qd} = 1208,47 \text{ kN}$$

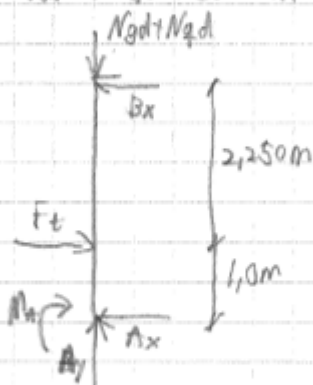
$$\text{Normaali voima } N_{ed} = 1208,47 \text{ kN}$$

$$F_t = 150 \text{ kN}$$

$$\rightarrow F_t - A_x - B_x = 0$$

$$\curvearrowright M_A + F_t \cdot 1,0 \text{ m} - B_x \cdot 3,250 \text{ m}$$

Vapaakappalekuva:



$$B_x = \frac{F_t \cdot l^2}{2 \cdot 3,250^2} \left( 2 + \frac{2,250}{3,250} \right) = 19,2 \text{ kN}$$

$$A_x = \frac{F_t \cdot 2,250}{2 \cdot 3,250} \left( 3 - \left( \frac{2,250}{3,250} \right)^2 \right) = 124,3 \text{ kN}$$

$$M_{t, \max} = 142,5 \cdot \frac{1 \cdot 2,250}{2 \cdot 3,250} \cdot \left( \frac{1}{3,250} - 2 \right) = -83,48 \text{ kNm}$$

$$e_0 = \frac{83,48 \text{ kNm}}{1208,47 \text{ kN}} = 69,1 \text{ mm}$$

$$e_{ii} = 8,125 \text{ mm}$$

$$i = 80,8 \text{ mm} \quad \lambda = \frac{0,7L}{80,8 \text{ mm}} = 28,16$$

$$k_{\varphi} = 2,19 \geq 1 \quad \text{OK}$$

$$e_2 = 28,6 \text{ mm}$$

$$M_{ed} = 127,9 \text{ kNm}$$

$$\eta = 0,43$$

$$m = 0,16$$

$$\rightarrow \omega = 0,1$$

$$\rightarrow A_s = 555 \text{ mm}^2$$

$$A_{s, \min} \leq A_s \leq A_{s, \max} \quad \text{OK}$$



